

**Н.И. Глушук, Э.Ю. Гордиенко,
Ю.Я. Пушкарь, Ю.В. Фоменко, Г.В. Шустакова**

Физико-технический институт низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины, Харьков

ТЕПЛОВИЗИОННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЖИДКИХ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ



Проведены тепловизионные исследования распределения тепловых полей на поверхности трубопровода, изолированного различными видами жидких теплоизолирующих покрытий. Измерены удельные тепловые потери на каждом участке и рассчитаны коэффициенты теплопроводности покрытий. Обнаружено значительное расхождение между полученными результатами и рекламируемыми данными.

Ключевые слова: энергосбережение, теплоизоляция, потери тепла, тепловизионное обследование.

За рубежом тепловизионный метод широко используется для диагностики технического состояния объектов теплоэнергетики с целью оптимизации энергосберегающих мероприятий и предотвращения выхода из строя тепло-технического оборудования. В Украине такая диагностика приобретает особое значение в условиях повышенного износа теплотехнического оборудования и постоянного роста цен на энергоносители. Однако заинтересованность предприятий теплоэнергетики в проведении регулярного тепловизионного обследования ограничивается, с одной стороны, высокой стоимостью импортных тепловизионных систем, а с другой стороны — отсутствием в этих системах специализированного программного обеспечения. Такое обеспечение позволило бы не только получать тепловые карты поверхностей теплотехнического оборудования, трубопроводов, зданий и сооружений, но и оперативно количественно оценивать тепловые потери, качество тепловой изо-

ляции, другие параметры в сравнение с нормативными данными.

В процессе разработки специальной тепловизионной системы с оригинальным программным продуктом по заказу коммунального предприятия «Харьковские тепловые сети» (КП «ХТС») авторы провели исследования тепловизионным методом изолирующих свойств нескольких образцов теплоизоляций нового класса — жидких сверхтонких теплоизолирующих покрытий (далее — *теплокраски*). Сегодня такие теплокраски производятся как в Украине, так и за рубежом и представлены на украинском рынке многими торговыми фирмами [1–3]. Согласно рекламе уникальные теплоизолирующие свойства теплокрасок (рекордно малые коэффициент теплопроводности $k \approx 0,001$ Вт/м·К, коэффициент теплового излучения [4] $\varepsilon \approx 0,2$ и, соответственно, большой коэффициент теплового отражения (до 0,8)) обусловлены наличием в них плотноупакованных керамических микросфер с разреженным воздухом, связанных между собой различными наполнителями (акриловыми полимерами с добавлением латекса, синтетических каучуков и др.).

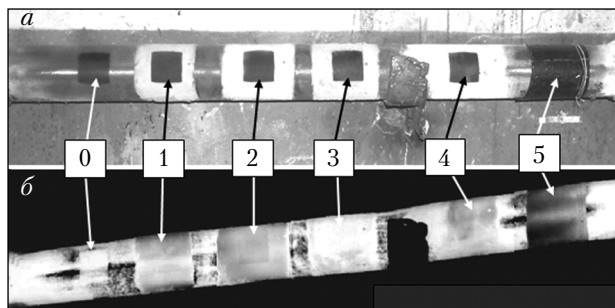


Рис. 1. Трубопровод с нанесенными теплоизолирующими покрытиями в видимом диапазоне (а) и в диапазоне 8—14 мкм (б)

Исследования проводили с целью:

1) выбрать наилучшую теплокраску для изоляции трубопроводов в КП «ХТС» или выявить области иного ее эффективного использования;

2) проверить на практике математические модели для специального программного обеспечения разрабатываемого тепловизора.

Измерения параметров теплокрасок проводились на действующем трубопроводе горячего водоснабжения (прямая подача) в отопительный период. Теплокраски, предоставленные для исследований КП «ХТС» и маркированные для объективности исследования только порядковыми номерами, наносились кистью на зачищенную сухую горячую поверхность стальной трубы диаметром 89 мм с толщиной стенки 6 мм. Было нанесено по 4 слоя каждой краски; последующий слой наносился через сутки после предыдущего. Для сравнения контрольный участок трубы был изолирован плоской рубероида толщиной 1,3 мм, плотно прижатой нитками к поверхности трубы.

Заметим, что в соответствии с нормами тепловизионного контроля качества теплоизоляции [5] использование тепловизионного метода для исследования объектов, имеющих коэффициент излучения поверхности менее 0,7, не является корректным. Для выравнивания и увеличения коэффициентов излучения всех исследуемых поверхностей на неизолированную трубу (образец 0), на поверхности тепло-

красок (образцы 1, 2, 3, 4) и на рубероиде (образец 5) был нанесен одинаковый тонкий слой (толщиной не более 0,05 мм) черной аэрозольной краски с коэффициентом излучения $\epsilon \approx 0,95$ в предположении, что теплокраски (согласно их заявленным рекламным характеристикам) имеют достаточно высокий коэффициент теплового отражения и, соответственно, малый коэффициент излучения поверхности (см. рис. 1, а).

Измерения проводились с помощью разработанного и изготовленного в Физико-техническом институте низких температур им. Б.И. Веркина НАН Украины тепловизора «ТК-1» [6], имеющего в диапазоне измеряемых температур следующие параметры:

- ✦ спектральный диапазон — 8—14 мкм;
- ✦ температурная чувствительность — 0,1 °C;
- ✦ точность измерения абсолютной температуры — ± 1 °C.

Было проведено две тепловизионные съемки (сессии): *первая* — после нанесения двух слоев красок, *вторая* — после нанесения четырех слоев. Дистанционные измерения температуры поверхностей проводились в стационарном режиме в помещении площадью 24 м² в отсутствие дополнительных источников тепла (кроме оператора) с расстояния 3 м. На рис. 1, б приведена термограмма трубопровода с нанесенными двумя слоями теплокрасок. Термограмма приведена в прямой черно-белой палитре (белый цвет соответствует более высоким температурам). Темные квазихолодные участки неизолированной трубы между теплокрасками обусловлены большим отражением более холодной комнаты от горячей поверхности очищенной от ржавчины трубы.

Распределение температуры на наружной поверхности трубопровода является функцией большого числа как внутренних факторов (параметров и теплофизических свойств теплоносителя, трубы, изоляции и их неоднородностей), так и внешних (условия теплообмена с окружающей средой). В стационарных условиях температурное поле на наружной повер-

хности трубопровода определяется существованием в каждой точке поверхности баланса между тепловым потоком, приходящим от теплоносителя, и теплоотдачей в окружающую среду.

Рассчитаем удельный тепловой поток q (поток тепла в единицу времени, отнесенный к единице поверхности) от теплоносителя трубопровода в окружающую среду. Обозначим составляющие потока как q_1 (количество тепла, отдаваемое единицей поверхности за одну секунду в окружающую среду), q_2 (удельный тепловой поток сквозь материал трубы перпендикулярно поверхности) и q_3 (удельный тепловой поток через изоляцию перпендикулярно поверхности).

Полагая рассматриваемые участки (зачерненные квадраты) поверхности трубы вертикальными, рассчитаем удельный тепловой поток (удельные тепловые потери) с интересующих нас участков поверхности изолированного трубопровода в окружающую среду [7]:

$$q_1 = \alpha_{\text{изл}} \cdot (T_{\text{кр}} - T_{\text{рад}}) + \alpha_{\text{конв}} \cdot (T_{\text{кр}} - T_{\text{в}}), \text{ Вт/м}^2. \quad (1)$$

Здесь $T_{\text{кр}}$ — температура поверхности теплокраски, измеренная с помощью тепловизора в области «черного квадрата» с учетом его коэффициента излучения, спектрального диапазона чувствительности тепловизора, угла наблюдения и качества поверхности [4]; $T_{\text{рад}}$ — радиационная температура помещения относительно исследуемой поверхности, определяемая температурами противоположной стены, пола и потолка с учетом их радиационных свойств [7]; $T_{\text{в}}$ — средняя температура воздуха в помещении; $\alpha_{\text{изл}}$ — коэффициент теплоотдачи, обусловленный радиационным теплообменом с окружающей средой (в нашем случае теплообмен с противоположной стеной, полом и потолком). Этот коэффициент можно рассчитать как [8]

$$\alpha_{\text{изл}} = \delta \cdot (T_{\text{кр}}^4 - T_{\text{рад}}^4) / (T_{\text{кр}} - T_{\text{рад}}), \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (2)$$

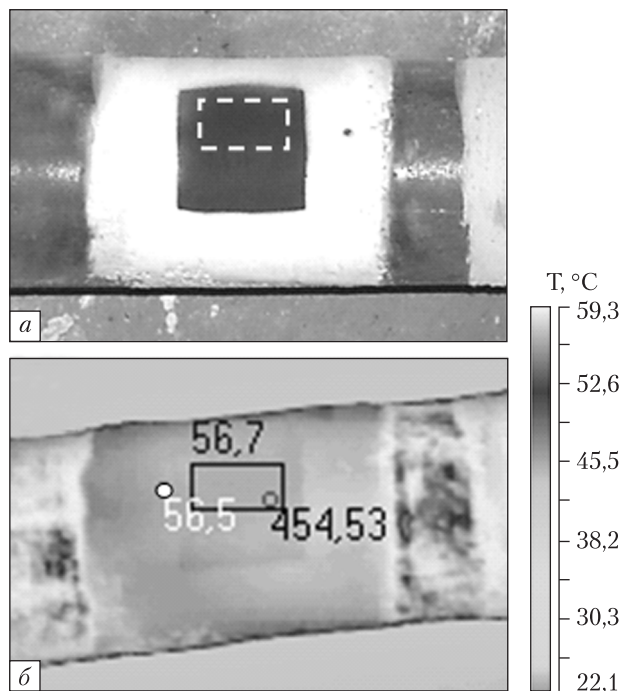


Рис. 2. Видимое (а) и тепловое (б) изображения фрагмента трубопровода, изолированного двумя слоями теплокраски-2

где $\delta = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — постоянная Стефана—Больцмана; $\alpha_{\text{конв}}$ — коэффициент теплоотдачи, обусловленный конвекцией, который для вертикальных поверхностей в помещении с комнатной температурой воздуха можно рассчитать как [7] $\alpha_{\text{конв}} = 1,66 \cdot (T_{\text{кр}} - T_{\text{в}})^{1/3}$.

Поскольку наше помещение имеет достаточно большую площадь ($>20 \text{ м}^2$), а поверхности стен, пола и потолка диффузные (шероховатые) с высокими коэффициентами излучения (для штукатурки известковой $\epsilon \approx 0,92$ [9], для краски пола масляной темно-коричневой $\epsilon \approx 0,94$ [9]), то можно считать, что $T_{\text{рад}} \approx T_{\text{в}}$. Тогда

$$q_1 = (\alpha_{\text{изл}} + \alpha_{\text{конв}}) \cdot (T_{\text{кр}} - T_{\text{в}}). \quad (3)$$

Таким образом, измеряя распределение температуры на поверхности трубопровода, можно оценить удельные тепловые потери с изолированных участков и сравнить их с потерями неизолрованного трубопровода.

На рис. 2 в качестве примера представлены видимое (а) и тепловое (б) изображения фраг-

мента трубопровода, изолированного двумя слоями теплокраски-2. На зачерненной области теплокраски отмечен прямоугольный фрагмент, средняя температура которого принималась для используемых расчетов как $T_{кр}$ (на термограмме $T_{кр} = 56,7$ °С при температуре теплоносителя 59 °С). Следует отметить, что температура поверхности этой теплокраски в незачерненной области (точка отмечена белым цветом) мало отличается от $T_{кр}$. Это свидетельствует о близости коэффициентов излучения данной теплокраски и черной аэрозольной краски с $\varepsilon \approx 0,95$ и, следовательно, о малости коэффициента отражения теплокраски-2 в спектральном диапазоне (8÷14) мкм. Черным цветом также указано полученное среднее значение удельных тепловых потерь в области прямоугольника. Аналогичные измерения были проведены на всех образцах.

Для количественной оценки коэффициента теплопроводности рассмотрим удельные тепловые потоки, приходящие перпендикулярно поверхности от теплоносителя к интересующим нас участкам поверхности.

Удельный тепловой поток сквозь материал трубы на неизолированном участке трубопровода (рис. 1, образец 0) равен [8]:

$$q_2 = k_{тр} (T_{вн} - T_{тр}) / h_{тр}, \quad (4)$$

где $k_{тр} = 52$ Вт/(м · К) — коэффициент теплопроводности стали (материал трубы); $T_{вн}$ — температура внутренней поверхности неизолированной трубы; $T_{тр}$ — температура наружной поверхности неизолированной трубы, измеренная с помощью тепловизора, с учетом коэффициента излучения «черного квадрата», угла наблюдения и качества поверхности; $h_{тр} = 6$ мм — толщина трубы (в предположении, что внутренняя поверхность трубы не покрыта отложениями солей или ржавчиной).

Рассмотрим изолированные участки трубы (рис. 1, образцы 1–5). Аналогично (4) перпендикулярный удельный тепловой поток сквозь материал трубы под изоляцией равен:

$$q_2 = k_{тр} (T_{вн.из} - T_{тр.из}) / h_{тр}, \quad (5)$$

где $T_{вн.из}$ — температура внутренней стенки трубы под изоляцией; $T_{тр.из}$ — температура наружной поверхности трубы под изоляцией.

Удельный тепловой поток сквозь изоляцию равен:

$$q_3 = k_{кр} (T_{тр.из} - T_{кр}) / h_{кр}, \quad (6)$$

где $k_{кр}$ — коэффициент теплопроводности теплокраски; $h_{кр}$ — толщина теплокраски.

В условиях термодинамического равновесия $q_1 = q_2 = q_3$, следовательно

$$(\alpha_{изл} + \alpha_{конв}) \cdot (T_{кр} - T_{ср}) = k_{тр} (T_{вн.из} - T_{тр.из}) / h_{тр} = k_{кр} \cdot (T_{тр.из} - T_{кр}) / h_{кр}. \quad (7)$$

Допустим, что при малой (как в нашем случае) эффективности изоляции и большой теплопроводности материала трубы температура внутренней поверхности трубы под изоляцией мало отличается от температуры внутренней поверхности неизолированной трубы: $T_{вн.из} \approx T_{вн}$. Тогда, измерив с помощью тепловизора значения температур на зачерненных поверхностях неизолированной трубы и всех теплокрасок, вычислив из выражения (4) температуру внутренней поверхности трубы $T_{вн}$ и заменив этим значением температуру внутренней поверхности трубы под изоляцией $T_{вн.из}$, можно из выражения (7) оценить коэффициенты теплопроводности каждой теплокраски $k_{кр}$.

В таблице представлены удельные тепловые потери с поверхностей теплокрасок и полученные их коэффициенты теплопроводности по результатам измерения температур поверхностей на двух тепловизионных сессиях (1-я сессия: температура теплоносителя — 59 °С, температура окружающей среды — 20 °С, два слоя теплокрасок; 2-я сессия: температура теплоносителя — 56,5 °С, температура окружающей среды — 20 °С, четыре слоя теплокрасок).

Получив значения коэффициентов теплопроводности на два порядка выше ожидаемых, мы исследовали микроструктуру поверхности образцов. На рис. 3 приведены микрофотографии в оптическом диапазоне образца 1, на поверхности которого наблюдается наибольшее число

микросфер диаметром 15–50 мкм (а), и образца 4 (б), на поверхности которого, как и в образцах 2 и 3, удалось выявить только отдельные микросферы (указаны стрелками). Сравнимые с образцом 1 значения коэффициента теплопроводности и минимальные удельные тепловые потери у образца 4 обусловлены, очевидно, более вспененной консистенцией его наполнителя.

Из рис. 3 видно, что в видимом диапазоне микросферы действительно имеется высокий коэффициент отражения (яркая точка в центре каждого пузырька), но даже для теплокраски-1 их количества явно недостаточно, чтобы быть определяющими как по коэффициенту отражения (краска в целом выглядит матовой в видимом диапазоне (см. рис. 1, а), так и по коэффициенту теплопроводности. На поверхности образцов 2, 3 и 4 были обнаружены лишь отдельные микросферы.

Проведенные тепловизионные исследования распределения тепловых полей на поверхности трубопровода, изолированного четырьмя видами жидких теплоизолирующих покрытий, подтвердили результаты экспериментальных исследований свойств аналогичных теплокрасок, выполненных другим методом [10], и показали несоответствие между полученными нами и рекламируемыми характеристиками образцов, а именно:

- ✦ коэффициенты теплопроводностей, оцененные из уравнений теплового баланса, оказались не меньше 0,1 Вт/(м · К) (т.е. на два

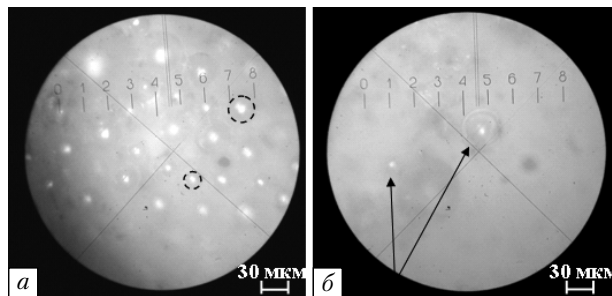


Рис. 3. Микрофотографии поверхностей теплокраски-1 (а) и теплокраски-4 (б)

порядка хуже ожидаемых значений!) и соответствовали по порядку величины коэффициенту теплопроводности наполнителей на основе вспененных акриловых смол (коэффициент теплопроводности полиметилметакрилата (акрила, плексигласа) $k_{\text{акр}} \approx (0,15–0,20)$ Вт/(м · К) [11]);

- ✦ коэффициенты излучения всех теплокрасок в спектральном диапазоне 8–14 мкм (который соответствует интересующему нас интервалу температур), качественно и количественно оцененные по термограммам, оказались порядка $\epsilon \approx (0,85–0,95)$, что в несколько раз выше заявленных и свидетельствуют лишь о незначительном отражении тепла в этом диапазоне длин волн;
- ✦ микроскопическое исследование поверхности данных теплокрасок выявило большой дефицит керамических микросфер в трех образцах из четырех. Но даже для тепло-

Параметры образцов

Номер сессии	Параметр	Номер образца					
		0 труба	1	2	3	4	5 рубероид
1	Толщина изоляции мм	0	0,6	0,7	0,7	0,9	1,3
	Удельные потери Вт/м ²	486,5	451,0	454,5	475,0	436,0	428,5
	Коэффициент теплопроводности Вт/(м · К)	—	0,10	0,18	0,60	0,14	0,16
2	Толщина изоляции мм	0	1,7	2,0	1,2	1,4	1,3
	Удельные потери Вт/м ²	441,0	383,5	398,5	432,0	381,0	406,0
	Коэффициент теплопроводности Вт/(м · К)	—	0,14	0,26	0,65	0,12	0,15

краски-1 (с максимальной плотностью микросфер) этого количества недостаточно для их «плотной упаковки», необходимой для кардинального уменьшения коэффициента теплопроводности;

- ✦ несмотря на большой коэффициент отражения отдельной микросферы в видимом диапазоне, их количества на поверхности оказалось недостаточно для всех образцов, чтобы в целом обеспечить высокое отражение солнечного излучения (блестящую поверхность в видимом диапазоне).

Таким образом, проведенные исследования выявили низкую эффективность четырех видов рассмотренных теплокрасок для использования их в качестве теплоизоляции трубопроводов. Что касается 2-й цели наших исследований (проверки на практике используемых расчетов), то рассчитанный по этой методике коэффициент теплопроводности рубероида $k_5 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (1-я сессия) и $k_5 = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ (2-я сессия) хорошо совпал с табличными данными $k_{\text{рубер}} = 0,17 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ [12].

С учетом погрешностей дистанционных и контактных измерений температур ($\Delta T = \pm 1^\circ \text{C}$), толщин красок ($\Delta h = \pm 0,05 \text{ мм}$), неоднородностей трубопровода и т.д., а также допущений, используемых при упрощенных инженерных расчетах, мы оцениваем точность измерения удельных тепловых потерь $\Delta q_1 \approx \pm 10 \text{ Вт}/\text{м}^2$, коэффициентов теплопроводности $\Delta k \approx \pm 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Работа выполнена в рамках научно-технического проекта «Разработка аппаратно-программного комплекса для дистанционной регистрации карт тепловых потерь объектов теплоэнергетики с целью оптимизации энергосберегающих технологий», финансируемого НАН Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жидкая керамическая теплоизоляция. — <http://www.napo34.ru/>.
2. Жидкое керамическое теплоизоляционное покрытие. — <http://www.domusrapide.com.ua/unikalnie-materiali/zhidkoe-keramicheskoe-teploizolyatsionnoe-pokritie>.

3. Сверхтонкая термоизоляция для промышленных объектов. — <http://mascoat.org/mascoat-m/17-texnicheskie-karakteristiki-mascoat-m.html>.
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография (Основы, техника, применение). — М.: Мир, 1988. — 400 с.
5. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций, ГОСТ 26629-85.
6. Тепловизионный программно-аппаратурный комплекс (TK-1). — http://www.ilt.kharkov.ua/bvi/technology/tk1/tk1_r-1.html.
7. Каменев П.Н., Сканава А.Н., Богословский В.Н. и др. Отопление и вентиляция (ч.1. Отопление). — М.: Стройиздат, 1975. — 480 с.
8. Зигель Р., Хауэл Дж. Теплообмен излучением. — М.: Мир, 1975. — 934 с.
9. Maldague X.P. Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive testing. New York: Wiley, 2001. — 565 p.
10. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Воробьев Л.И. и др. О реальных физических свойствах и возможностях «теплоизолирующих» красок // Промышленная теплотехника. — 2006. — Т. 28, № 5. — С. 93–96.
11. ДБН В.2.6-31:2006. Конструкції будинків і споруд. Теплоізоляція будівель. — К.: Мінбуд України, 2006. — 66 с.
12. Воронкова Е.М., Гречушников Б.Н., Дистлер Г.И., Петров И.П. Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965. — 335 с.

М.І. Глушук, Е.Ю. Гордієнко,
Ю.Я. Пушкар, Ю.В. Фоменко, Г.В. Шустакова

ТЕПЛОВІЗІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РІДКИХ ТЕПЛОІЗОЛЮЮЧИХ ПОКРИТТІВ

Проведені тепловізійні дослідження розподілу теплових полів на поверхні трубопроводу, ізолюваного різними видами рідких теплоізолюючих покриттів. Виміряні питомі теплові втрати на кожній ділянці та розраховані коефіцієнти теплопровідності покриттів. Виявлено значну розбіжність між отриманими результатами та даними, що рекламуються.

Ключові слова: енергозбереження, теплоізоляція, втрати тепла, тепловізійне обстеження.

N.I. Glushchuk, E.Yu. Gordiyenko,
Yu.Ya. Pushkar, Yu.V. Fomenko, G.V. Shustakova

THERMAL IMAGING RESEARCH OF LIQUID HEAT INSULATION COATING

Thermal imaging study of temperature fields distribution on the pipeline surface coated with various liquid insulators was carried out. Specific heat losses from each region of pipeline were measured and the thermal conductivities of the insulators were calculated. A significant discrepancy between obtained and expected results was observed.

Key words: energy saving, heat insulation, heat loss, thermal imaging.

Стаття надійшла до редакції 15.06.11